



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 103 39 048 A1 2004.04.01

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 103 39 048.0

(51) Int Cl. 7: H01F 6/04

(22) Anmeldetag: 25.08.2003

(43) Offenlegungstag: 01.04.2004

(30) Unionspriorität:

10/254805 26.09.2002 US

(71) Anmelder:

Praxair Technology, Inc., Danbury, Conn., US

(74) Vertreter:

Schwan Schwan Schorer, 80796 München

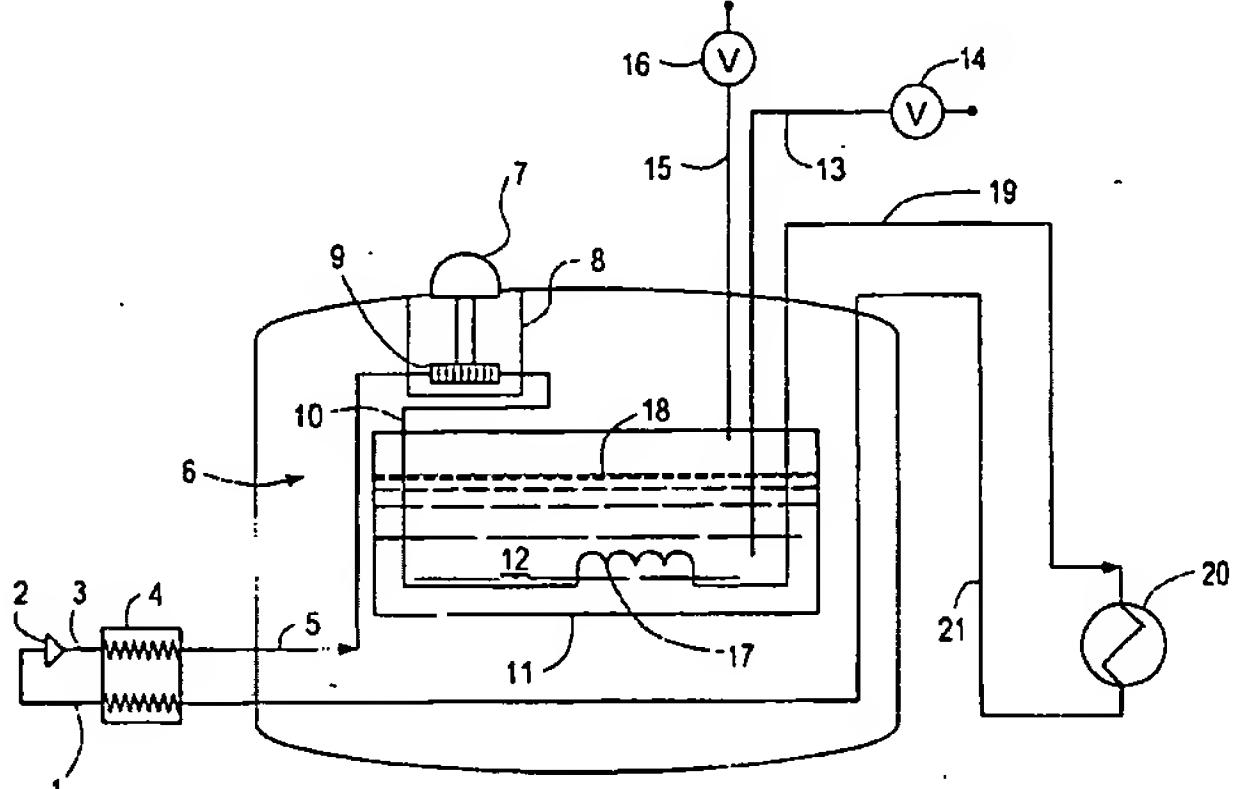
(72) Erfinder:

Rampersad, Bryce Mark, Williamsville, N.Y., US;  
Bonaquist, Dante Patrick, Grand Island, N.Y., US;  
Minbolie, Barry Alan, East Amherst, N.Y., US;  
Acharya, Arun, East Amherst, N.Y., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: Tieftemperaturkühlsystem für Supraleiter

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein System zum Zuführen von Kälte zu einer supraleitenden Vorrichtung, wobei ein Kühlfluid gekühlt wird, indem es Kälte von einem oder mehreren Kryokühlem aufnimmt, und anschließend mittels indirektem Wärmeaustausch mit Ballastflüssigkeit erwärmt wird, wodurch die Ballastflüssigkeit gekühlt wird, bevor der supraleitenden Vorrichtung Kälte zugeführt wird.



## Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich allgemein auf das Bereitstellen von Kälte und insbesondere auf das Bereitstellen von Kälte für Supraleiteranwendungen.

## Stand der Technik

[0002] Bei der Supraleitung handelt es sich um das Phänomen, bei welchem bestimmte Metalle, Legierungen und Verbindungen den elektrischen Widerstand verlieren, so dass sie eine unendliche elektrische Leitfähigkeit haben. Bis vor kurzem wurde Supraleitung nur bei extrem niedrigen Temperaturen knapp oberhalb des absoluten Nullpunkts beobachtet. Es ist sehr kostspielig, Supraleiter bei solch niedrigen Temperaturen zu halten, was typischerweise die Verwendung von flüssigem Helium erfordert, wodurch die kommerziellen Anwendungen für diese Technologie begrenzt sind.

[0003] Kürzlich wurde eine Anzahl von Materialien entdeckt, welche Supraleitung bei höheren Temperaturen, beispielsweise im Bereich von 15 bis 75 K, zeigen. Flüssiger Stickstoff, welcher eine relativ kostengünstige Möglichkeit zum Bereitstellen von Tieftemperaturkälte bietet, kann nicht in effektiver Weise Kälte bereitstellen, um die supraleitenden Temperaturen der meisten Hochtemperatur-Supraleiter zu erreichen.

[0004] Ein aus hochtemperatur-supraleitenden Materialien gefertigtes elektrisches Übertragungskabel bietet wesentliche Vorteile für die Übertragung von großen Elektrizitätsmengen bei sehr niedrigen Verlusten. Die Leistungsfähigkeit von Hochtemperatur-Supraleitermaterial verbessert sich um etwa eine Größenordnung bei Temperaturen von etwa 30 bis 40 K, verglichen mit Temperaturen um 80 K, die mit der Verwendung von flüssigem Stickstoff erzielt werden. Die Anwendung von supraleitenden Vorrichtungen wie beispielsweise Motoren, Transformatoren, Generatoren, Magneten usw. hängt zum Teil von der Entwicklung von verlässlichen Kühlsystemen ab. Supraleitende Systeme müssen bei Temperaturen im Bereich von 4 bis 80 K gehalten werden und müssen, ausgehend von Umgebungstemperatur bis hinunter zur Betriebstemperatur des supraleitenden Systems, von Wärmelecks abgeschirmt werden.

## Aufgabenstellung

[0005] Folglich ist es eine Aufgabe der Erfindung, ein effektives und verlässliches System zum Bereitstellen von Kälte für supraleitende Vorrichtungen zu schaffen.

[0006] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren zum Bereitstellen von Kälte für supraleitende Vorrichtungen gemäß Anspruch 1 sowie eine Anordnung zum Bereitstellen von Kälte für supraleitende Vorrichtungen gemäß Anspruch 6.

[0007] Der Begriff „tiefe Temperatur“ soll hier eine Temperatur von 120 K oder niedriger bezeichnen.

[0008] Der Begriff „Kryokühler“ soll hier eine Kühlmaschine bezeichnen, die in der Lage ist, tiefe Temperaturen zu erreichen und zu halten.

[0009] Der Begriff „Supraleiter“ soll hier ein Material bezeichnen, welches seinen gesamten Widerstand bezüglich der Leitung eines elektrischen Stroms verliert, sobald das Material eine bestimmte tiefe Temperatur erreicht.

[0010] Der Begriff „Kälte“ bzw. „Kühlung“ soll hier die Fähigkeit bezeichnen, Wärme von einem System fernzuhalten, das sich bei einer unterhalb der Umgebungstemperatur liegenden Temperatur befindet.

[0011] Der Begriff „indirekter Wärmeaustausch“ soll hier das in-eine-Wärmeaustauschbeziehung-Bringen von Fluiden ohne jeglichen physikalischen Kontakt oder jegliches Mischen der Fluide miteinander bezeichnen.

[0012] Der Begriff „direkter Wärmeaustausch“ soll hier den Kälteübergang mittels Kontakt mit Kühl- und Heizsystemen bezeichnen.

[0013] Der Begriff „supraleitende Vorrichtung“ soll hier Vorrichtungen bezeichnen, welche supraleitendes Material verwenden; beispielsweise in Form eines Drahts für die Spulen eines Rotors für einen Generator oder einen Motor oder für die Spulen eines Magneten oder Transformators.

## Stand der Technik

[0014] Im folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen beispielhaft näher erläutert. Dabei zeigt:

[0015] Fig. 1 eine schematische Darstellung einer bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Tieftemperaturkühlsystems für Supraleiter;

[0016] Fig. 2 eine schematische Darstellung einer weiteren bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Tieftemperaturkühlsystems für Supraleiter; und

[0017] Fig. 3 eine schematische Darstellung einer anderen bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Tieftemperaturkühlsystems für Supraleiter.

[0018] Gemäß Fig. 1 wird ein Kühlfluid 1 bei einem Druck zwischen 1,38 und 2,07 bar (20–30 psia) mittels Durchleiten durch einen Kompressor bzw. eine Pumpe 2 umgewälzt, und das sich ergebende Kühlfluid 3 wird in einem Rekuperatorwärmetauscher 4 mittels indirektem Wärmeaustausch mit umgewälztem Kühlfluid gekühlt, wie dies nachfolgend näher beschrieben ist. Kühlfluid 5 gelangt dann von dem Wärmetauscher 4 in einen abgeschlossenen Behälter 6, der vorzugsweise unter Vakuum steht, beispielsweise bei einem Druck allgemein zwischen 0,13 und 0,0013 Pa ( $10^{-3}$  bis  $10^{-5}$  Torr). Der evakuierte Raum sorgt für eine Isolation bezüglich konvektivem und konduktivem Wärmeübergang auf Vorrichtungen und Fluide bei tiefen Temperaturen. Typischerweise ist

die Vakuumisolierung mit Strahlungsschilden kombiniert, um Wärmelecks von der Umgebung auf die bei tiefen Temperaturen befindlichen Vorrichtungen und Fluide in dem System zu minimieren. Obschon in den Zeichnungen aus Gründen der Klarheit der Rekupeatorwärmetauscher als außerhalb des evakuierten Behälters befindlich dargestellt ist, ist dieser in der Praxis vorzugsweise in dem evakuieren Behälter eingeschlossen oder, da er bei tiefen Temperaturen arbeitet, er ist in einem eigenen Vakuumraum isoliert.

[0019] Das in der Praxis der Erfindung verwendete Kühlfluid kann gasförmig, flüssig oder als Phasengemisch, z.B. gasförmig und flüssig, vorliegen. Bei dem in der Praxis der Erfindung bevorzugten Kühlfluid handelt es sich um Helium. Andere Fluide, welche in der Praxis der Erfindung als Kühlfluid verwendet werden können, sind beispielsweise Neon und Gemische, welche Helium und/oder Neon enthalten.

[0020] Das Kühlfluid 5, welches sich typischerweise bei einer Temperatur zwischen 30 und 50 K befindet, wird zu einem Kryokühler 7 geleitet, der sich in einer Vakuumhülle 8 befindet. Die Vakuumhülle F, sorgt für eine Isolierung des kalten Endes des Kryokühlers 7 und eines am kalten Ende angeordneten Wärmetauschers 9. Die Vakuumräume, welche die Ballastflüssigkeit und den Kryokühler 7 isolieren, werden vorzugsweise getrennt gehalten, um die Wartung und Entfernung des Kryokühlers 7 ohne Beeinträchtigung der Isolierung der Ballastflüssigkeit zu ermöglichen.

[0021] In der in **Fig. 1** gezeigten Ausführungsform der Erfindung handelt es sich bei dem Kryokühler 7 um ein Gifford-McMahon-Kühlsystem. Bei anderen Kryokühlern, die in der Praxis der Erfindung verwendet werden können, handelt es sich z.B. um einen Pulsröhrenkühler (pulse tube refrigerator). Dem Fachmann sind solche Kryokühler und ihre Betriebsweise bekannt.

[0022] Gemäß **Fig. 1** wird das Kühlfluid 5 durch den am kalten Ende des Kryokühlers 7 befindlichen Wärmetauscher 9 geleitet, in welchem dem Kühlfluid Kälte zugeführt wird, welche aus dem Kryokühler 7 in einem kalten Zustand als gekühltes Kühlfluid 10 austritt, das sich allgemein bei einer Temperatur im Bereich von 20 bis 30 K befindet.

[0023] Innerhalb des evakuierten Behälters 6 ist ein Ballasttank 11 angeordnet, welcher Ballastflüssigkeit 12 enthält. Bei der in der Praxis der Erfindung bevorzugten Ballastflüssigkeit handelt es sich um Neon. Bei anderen Fluiden, die in der Praxis der Erfindung als Ballastflüssigkeit verwendet werden können, handelt es sich beispielsweise um Wasserstoff, Stickstoff und Gemische, die Neon, Wasserstoff und/oder Stickstoff enthalten. Die Ballastflüssigkeit wird dem Ballasttank 11 über eine Fülleitung 13 und ein Ventil 14 zugeführt, und verdampfte Ballastflüssigkeit wird aus dem Ballasttank 11 über eine Entlüftungsleitung 15 und ein Ventil 16 heraus geleitet.

[0024] Die Ballastflüssigkeit 12 befindet sich bei einer Temperatur, die höher als die Temperatur des gekühlten Kühlfluids 10 ist. Typischerweise liegt die

Temperatur der Ballastflüssigkeit 12 im Bereich von 25 bis 35 K und übersteigt die Temperatur des gekühlten Kühlfluids 10 um 2 bis 5 K. Das gekühlte Kühlfluid wird in indirekten Wärmeaustausch mit Ballastflüssigkeit 12 gebracht. Das gekühlte Kühlfluid wird mittels indirektem Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit erwärmt, wodurch der Ballastflüssigkeit Kälte zugeführt wird. Bei der in **Fig. 1** veranschaulichten Ausführungsform der Erfindung findet dieser indirekte Wärmeaustausch zwischen dem gekühlten Kühlfluid und der Ballastflüssigkeit statt, indem das gekühlte Kühlfluid durch einen Ballastwärmetauscher 17 geleitet wird, welcher innerhalb des Ballasttanks 11 angeordnet ist und sich unterhalb des Flüssigkeitspegels bzw. der Oberfläche 18 der Ballastflüssigkeit 12 befindet.

[0025] Das Kühlfluid tritt nach dem indirekten Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit als Kühlfluid 19 aus und weist eine Temperatur auf, welche die Temperatur des gekühlten Kühlfluids 10 Typischerweise um 1 bis 4 K übersteigt. Nach dem indirekten Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit wird das Kühlfluid zu einer supraleitenden Vorrichtung 20 geleitet, welcher es entweder mittels direktem oder mittels indirektem Wärmeaustausch Kälte zuführt. Bei der supraleitenden Vorrichtung kann es sich in der Praxis der Erfindung beispielsweise um Generatoren, Motoren, Magneten und Transformatoren handeln.

[0026] Nach dem Wärmeaustausch mit der supraleitenden Vorrichtung 20 befindet sich das Kühlfluid 21 typischerweise bei einer Temperatur zwischen 25 und 30 K und wird zu dem Wärmetauscher 4 zurück geführt. Das Kühlfluid wird mittels Durchleiten durch den Wärmetauscher 4 mittels indirektem Wärmeaustausch mit Kühlfluid 3, wie oben beschrieben, weiter erwärmt und tritt aus dem Wärmetauscher 4 als Kühlfluidstrom 1 aus, und der Umwälzkühlfluidzyklus beginnt von neuem.

[0027] Das Erwärmen des gekühlten Kühlfluids mittels indirektem Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit in dem Ballasttank, wodurch die Ballastflüssigkeit gekühlt wird, stellt einen sehr wichtigen Aspekt der vorliegenden Erfindung dar. Mittels dieses Wärmeaustauschschritts, der im Gegensatz zu jeglicher konventioneller Praxis steht, wird die Ballastflüssigkeit bei einer hinreichend niedrigen Temperatur und in flüssigem Zustand gehalten, so dass, falls der Kryokühler versagt oder die Kryokühlerkühlkapazität verringert ist, die Ballastflüssigkeit die Kühlfunktion übernehmen kann, um eine effektive Zufuhr von gekühltem Kühlfluid zu der supraleitenden Vorrichtung zu ermöglichen, um Supraleitungsbedingungen bei niedriger Temperatur aufrecht zu erhalten, bis der Kryokühler repariert oder ersetzt wird oder die Kryokühlerfunktion auf andere Weise wieder hergestellt wird. Dies erhöht die Verlässlichkeit und somit den Wert des Kühlsystems für den Supraleiter erheblich. Die Erfindung nutzt den relativ großen Temperaturunterschied an dem kalten Ende des Kryokühlers für

eine höhere Wärmeübergangskapazität und die wesentlich erhöhte Kühlkapazität des Kryokühlers aufgrund der Tatsache, dass das kalte Ende bei der höchsten Tiefentemperatur in dem System betrieben wird, aus.

[0028] Die in **Fig. 1** veranschaulichte Ausführungsform stellt eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung dar. Jedoch können auch andere Ausführungsformen der Erfindung ausgeführt werden. Beispielsweise kann eine Mehrzahl von Kryokühlern in paralleler oder serieller Anordnung verwendet werden, um das Kühlfluid zu kühlen, bevor es in indirekten Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit gebracht wird. Bei einer anderen Ausführungsform wird das Kühlfluid nach dem indirekten Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit gekühlt, indem es ein zweites Mal durch den Kryokühler geleitet wird, bevor es zu dem Supraleiter geleitet wird.

[0029] **Fig. 2** veranschaulicht eine andere bevorzugte Ausführungsform der Erfindung. Die in **Fig. 2** verwendeten Bezugszeichen entsprechen den in **Fig. 1** für die gemeinsamen Elemente verwendeten Bezugszeichen, und diese gemeinsamen Elemente werden nicht nochmals im Detail diskutiert.

[0030] Gemäß **Fig. 2** wird Kühlfluid **19** nach dem indirekten Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit zu einem zweiten Kryokühler **30** geleitet, bei welchem es sich in der in **Fig. 2** veranschaulichten Ausführungsform um einen Gifford-McMahon-Kühler handelt. Der Kryokühler **30** ist innerhalb des evakuierten Behälters **6** in einer Vakuumhülle **31** angeordnet. Das Kühlfluid **19** wird mittels Durchleiten durch einen kalten Wärmetauscher **32** des zweiten Kryokühlers **30** gekühlt und tritt aus diesem als Kühlfluid **33** aus, welches eine Temperatur aufweist, die niedriger, allgemein um 1 bis 10 K niedriger, als diejenige des Kühlfluids **19** ist und allgemein im Bereich von 20 bis 25 K liegt. Das bei niedriger Temperatur befindliche Kühlfluid **33** wird zu der supraleitenden Vorrichtung **20** geleitet, um dieser Kälte zuzuführen, wie dies oben beschrieben ist.

[0031] **Fig. 3** veranschaulicht eine weitere bevorzugte Ausführungsform der Erfindung, wobei der Kryokühler an seinem kalten Ende einen Mehrfach-Durchgang-Wärmetauscher aufweist. Die Bezugszeichen in **Fig. 3** entsprechen für die gemeinsamen Elementen denjenigen von **Fig. 1** und **Fig. 2**, und diese gemeinsamen Elemente werden nicht nochmals im Detail diskutiert.

[0032] Gemäß **Fig. 3** wird Kühlfluid **19** nach dem indirekten Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit zurück zu dem Kryokühler **7** geleitet, welcher einen am kalten Ende angeordneten Wärmetauscher **34** mit Durchlässen **40** und **41** aufweist. Kühlfluid **19** wird mittels Durchleiten durch den Durchlaß **41** des Wärmetauschers **34** gekühlt und tritt aus diesem als Kühlfluid **35** aus. Bei dieser Ausführungsform wird Kühlfluid **5** durch den Durchlaß **40** des Mehrfach-Durchgang-Wärmetauschers **34** geleitet, um gekühlt zu werden, um gekühltes Kühlfluid **10** zu bilden. Das

Kühlfluid **35** weist eine Temperatur auf, welche niedriger, allgemein um 1 bis 5 K, als diejenige des Kühlfluids **19** ist und allgemein im Bereich von 25 bis 30 K liegt. Tieftemperaturkühlfluid **35** wird zu der supraleitenden Vorrichtung **20** geleitet, um dieser Kälte zuzuführen, wie dies oben beschrieben ist.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Bereitstellen von Kälte für eine supraleitende Vorrichtung, wobei im Zuge des Verfahrens:

- (A) von einem Kryokühler einem Kühlfluid Kälte zugeführt wird, um gekühltes Kühlfluid zu erzeugen;
- (B) das gekühlte Kühlfluid mittels indirektem Wärmeaustausch mit Ballastflüssigkeit erwärmt wird; und danach
- (C) das Kühlfluid zu der supraleitenden Vorrichtung geleitet wird und der supraleitenden Vorrichtung Kälte zugeführt wird.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei das Kühlfluid Helium aufweist.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die Ballastflüssigkeit Neon aufweist.

4. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei das Kühlfluid nach dem indirekten Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit gekühlt wird, bevor das Kühlfluid zu der supraleitenden Vorrichtung geleitet wird.

5. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei der indirekte Wärmeaustausch des Kühlfluids mit der Ballastflüssigkeit ausgeführt wird, indem das Kühlfluid durch einen Wärmetauscher geleitet wird, welcher innerhalb eines Ballasttanks angeordnet ist, welcher die Ballastflüssigkeit umgibt.

6. Anordnung zum Bereitstellen von Kälte für eine supraleitende Vorrichtung, mit:

- (A) einem Kryokühler und Mitteln zum Überleiten von Kühlfluid zu dem Kryokühler;
- (B) einem Ballasttank, der eine Ballastflüssigkeit enthält, und Mitteln, um Kühlfluid von dem Kryokühler in indirektem Wärmeaustausch mit der Ballastflüssigkeit innerhalb des Ballasttanks zu leiten; und
- (C) einer supraleitenden Vorrichtung und Mitteln zu überleiten von Kühlfluid von dem Ballasttank zu der supraleitenden Vorrichtung.

7. Anordnung gemäß Anspruch 6, wobei es sich bei dem Kryokühler um einen Gifford-McMahon-Kühler oder einen Pulsröhrenkühler handelt

8. Anordnung gemäß Anspruch 6, wobei der Ballasttank innerhalb eines evakuierten Behälters angeordnet ist.

9. Anordnung gemäß Anspruch 6, wobei der Kry-

okühler innerhalb einer Vakuumumhüllung innerhalb eines evakuierten Behälters angeordnet ist.

10. Anordnung gemäß Anspruch 6, wobei der Kryokühler einen Mehrfach-Durchgang-Wärmetauscher aufweist und wobei die Mittel zum Überleiten von Kühlfluid von dem Ballastank zu der supraleitenden Vorrichtung den Kryokühler umfassen.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

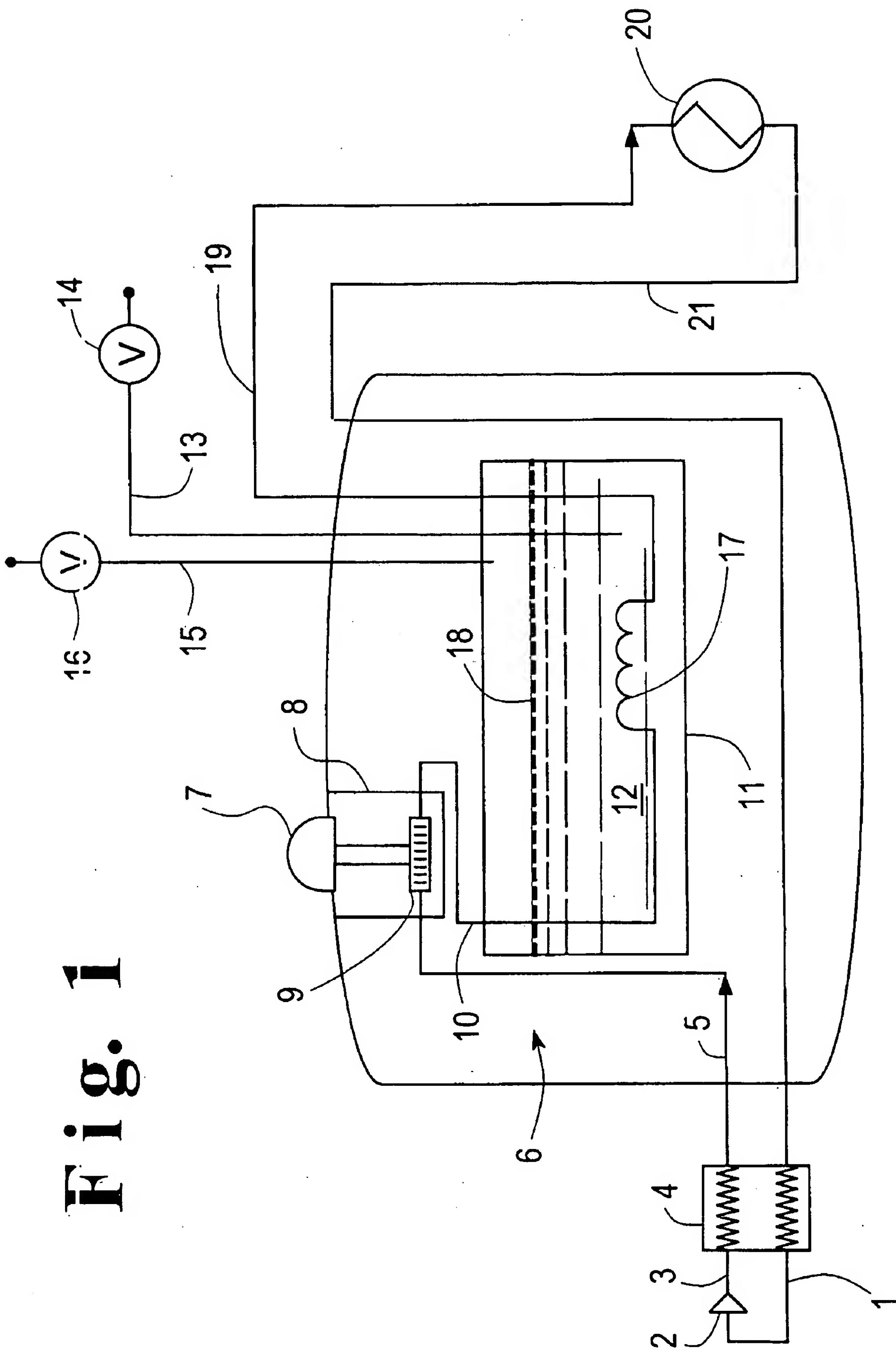
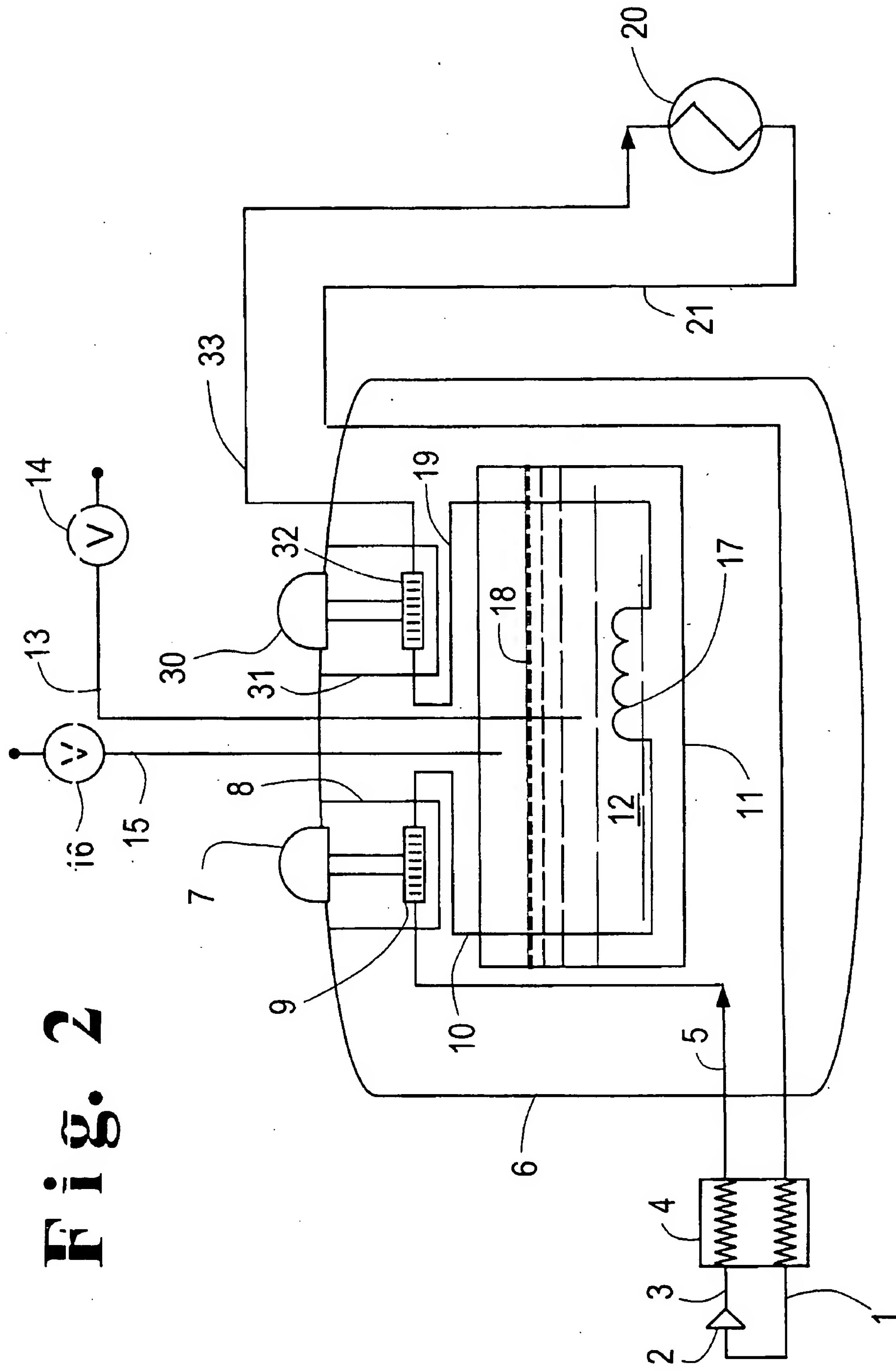


FIG. 2



3  
bi  
i  
E

